

# Daten der Landesvermessung zur räumlichen Interpolation von Bodenbewegungen

MARCO BROCKMEYER, M.Sc.

Zur Bereitstellung eines einheitlichen integrierten Raumbezugs ist das Aktualitätsgebot der Festpunktfelder ein wesentliches Qualitätsmerkmal. Vorhandene Veränderungen der Erdoberfläche bewirken eine stetige Verringerung der Aktualität des amtlichen Raumbezugs, da sich die aktuell gemessenen und berechneten Koordinaten von den im Nachweis geführten Koordinaten zunehmend unterscheiden. Zur genauen Abgrenzung der Einflussbereiche von Bodenbewegungen werden daher alle verfügbaren Daten des LGLN für den Aufbau eines niedersächsischen Bodenbewegungsdienstes aufbereitet und auf Veränderungen der Lage- und Höhenkomponenten analysiert. Eine weitere wichtige Säule zum Aufbau dieses Dienstes bilden PSI-Analysen, da mit dieser Technik der Fernerkundung auch Bewegungen außerhalb der linien- und punktförmigen geodätischen Netze erfasst werden können.

Die gesammelten numerischen Bewegungsinformationen werden zunächst gebietsweise zur grafischen Visualisierung unter Verwendung eines erweiterten Kriging-Ansatzes zu einem Bodenbewegungsmodell kombiniert. Auf Grundlage derart geschätzter Bewegungsmodelle können Erhaltungsmaßnahmen sowie Wiederholungsmessungen im amtlichen Bezugsrahmen bedarfsorientiert angepasst und durchgeführt werden, wodurch die Aktualität des Raumbezugs gesteigert wird. Perspektivisch können die modellierten Geschwindigkeiten auch zur Berechnung von zusätzlichen Korrekturdaten des *SAPoS*<sup>®</sup>-Dienstes HEPs dienen. Mithilfe von bereitgestellten örtlichen und zeitlichen Transformationsparametern könnten lokale Anpassungen der Liegenschaftsvermessungen in Bodenbewegungsgebieten für den Nutzer entfallen.

**Schlüsselwörter** – Bodenbewegungsdienst Niedersachsen, Geostatistik, Kriging, Hengstlage

## 1. Einleitung

Das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) ist mit der Wahrnehmung der gesetzlichen Aufgabe der Bereitstellung eines einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs beauftragt. Realisiert durch das Landesbezugssystem kann für jeden Punkt auf der Landesfläche die Lage, Position, Höhe und Schwere in einem einheitlichen geodätischen System bestimmt werden (MI 2016). Zur Qualitätssicherung und Einhaltung des Aktualitätsgebotes sind regelmäßige Überprüfungen und ggf. epochengleiche, bundesweite Wiederholungsmessungen im amtlichen geodätischen Bezugsrahmen durchzuführen (ADV 2017). Diese Ergebnisse sind als Zeitreihen im amtlichen Festpunktinformationssystem (AFIS) zu sichern und dienen als Grundlage zur Untersuchung von rezenten Bewegungen der Erdkruste, wodurch sich eine interdisziplinäre Schnittstelle öffnet. So können Wiederholungsmessungen im Festpunktfeld z.B. zur Beantwortung von geophysischen Fragestellungen beitragen oder für ein Monitoring von anthropogenen Bewegungen der Erdoberfläche verwendet werden.

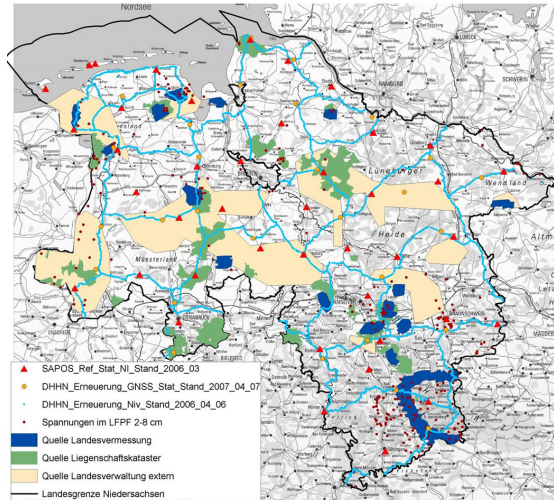


Abbildung 1: Bodenbewegungsinduzierte Einflussbereiche in Niedersachsen

Systematische Untersuchungen unterschiedlicher Datenquellen ergaben bereits 2007, dass ca. 30% der niedersächsischen Landesfläche von Bodenbewegungen aufgrund von Rohstoffabbau, den Bau und Betrieb von Kavernenanlagen sowie von der Speicherung von CO<sub>2</sub> und Kohlenwasserstoffen beeinflusst werden (JAHN ET AL. 2011). Die Abbildung 1 zeigt die seinerzeit sehr grob abgegrenzten Bodenbewegungsgebiete ohne Bezug zu zeitlichen Komponenten und deren Änderungsbeträgen. Weiterführende Analysen im Verbundprojekt zum Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS) ergaben zudem systematische Senkungen bis zu 3 mm/Jahr im Nordseeküstenbereich, die geologische Ursachen vermuten lassen (WÄNNINGER ET AL. 2009).

Die Verringerung der Aktualität des amtlichen Raumbezugs wirkt sich unter Anderem in Liegenschaftsvermessungen in Bodenbewegungsgebieten unter Verwendung der SAPOS<sup>®</sup>-Dienste aus, da hierbei der Anschluss an weiter entfernte, stabile SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationen erfolgt. Um den so entstehenden Differenzen entgegenzuwirken, sollten die bereitgestellten Korrekturdaten des SAPOS<sup>®</sup>-HEPS Dienstes um örtliche und zeitabhängige Transformationsparameter ergänzt werden. Dadurch könnten dem Nutzer hochgenaue Positionierungen ohne lokale Anpassung unter Verwendung örtlicher Transformationspunkte ermöglicht werden.

Diese gebietspezifisch angepassten Korrekturdaten zur Überführung aktuell gemessener in amtliche Koordinaten könnten perspektivisch auf einem aufzubauenden Bodenbewegungsdienst basieren, in dem graphische Darstellungen und numerische Informationen über Bodenbewegungsgebiete modelliert und bereitgestellt werden. Zudem kann der Dienst zu bedarfsorientierten Erhaltungsmaßnahmen sowie Wiederholungsmessungen im amtlichen Bezugsrahmen beitragen, wodurch die Aktualität des Nachweises gesteigert werden kann.

## 2. Strategie zum Aufbau eines Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen

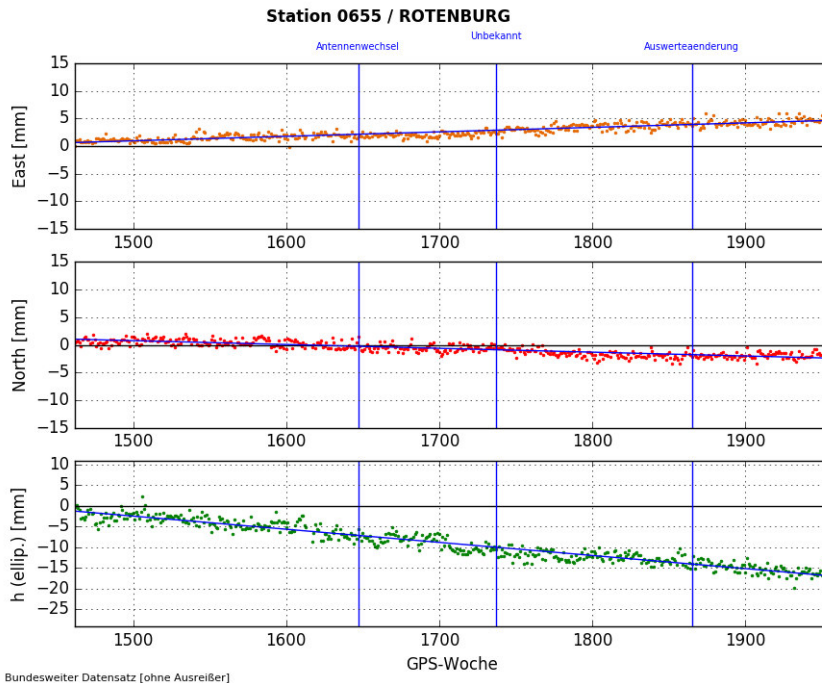
Grundlage zum Aufbau des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen bilden aktuelle und historische Messungsdaten aus denen Geschwindigkeitsinformationen abgeleitet werden können. Hierzu werden zunächst die vorhandenen Zeitreihen der Höhen- und Lagefestpunkte im AFIS für die niedersächsische Landesfläche aufbereitet und auf zeitliche Veränderungen analysiert. Um systematische Datumseinflüsse in den ermittelten Bewegungsraten zu reduzieren, werden beispielsweise nur Höhen unterschiedlicher Epochen verglichen, die im gleichen Höhen Bezugssystem vorliegen. Um gezielt Gebiete auf Bodenbewegungen zu untersuchen ist zudem eine enge Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Nutzern erforderlich, die Änderungen an der Erdoberfläche feststellen. Darüber hinaus sind interdisziplinäre Zusammenarbeiten mit anderen geowissenschaftlichen Fachverwaltungen, Hochschulen und Universitäten zu einem qualitätsgesicherten Bodenbewegungsdienstes unerlässlich.

Neben den vorhandenen Zeitreihen der Ergebnishöhen für die Höhenfestpunkte, die aus verschiedenen Auswerteverfahren und nicht zwangsläufig aus epochengleichen homogenen Ausgleichungen stammen, werden auch die nivellierten Höhenunterschiede aus mehreren Messkampagnen aufbereitet und in einer Datenbank der Messungselemente einschließlich der zugehörigen Metadaten dauerhaft abgelegt. Dazu werden auch historische, analoge Linienverzeichnisse digitalisiert und Koordinaten von untergegangenen, nicht im AFIS geführten Höhenfestpunkten sowie seinerzeit verwendeten Hilfspunkten rekonstruiert und nacherfasst. Die Aufbereitungsmaßnahmen der Messungselemente umfassen die Höhenetze 1. und bedarfsorientiert der 2. Ordnung, mit dem Ziel, die gemessenen Höhenunterschiede in einer epochenübergreifenden, kinematischen Einzelpunktausgleichung auf Bewegungen zu analysieren (ZIPPELT 1988). Unter Verwendung dieses Ansatzes lassen sich mit höchster Genauigkeit Geschwindigkeiten für jeden Höhenfestpunkt in einer homogenen Netzausgleichung berechnen.

Zur Qualitätssicherung der SAPOS<sup>®</sup>-Dienste wird in Niedersachsen seit 2008 ein einheitliches Koordinatenmonitoring der SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationen unter Verwendung der GNSMART-Software kontinuierlich durchgeführt. Ergebnis dieser wöchentlichen GNSS-Auswertungen sind freie Koordinatenlösungen mit vollständiger Stochastik, die in Zeitreihenanalysen zur Bestimmung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens der Referenzstationen untersucht werden. Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch das Analyseergebnis der in einem Bodenbewegungsgebiet gelegenen Station Rotenburg. Die vom LGLN durchgeführten bundesweiten Referenzstationsanalysen wurden in einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zur Überführung von PSI-Ergebnissen in ein einheitliches Auswertenniveau verwendet (KALIA ET AL. 2017).

PSI-Analysen bilden eine weitere wichtige Säule des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen, da mit dieser Technik auch Bewegungen außerhalb der linien- und punktförmigen geodätischen Netze erfasst werden können und eine flächenhafte Erfassung und Abgrenzung der Einflussbereiche von Bodenbewegungsgebieten gestützt wird.

Die beschriebenen Daten der Landesvermessung und die Resultate der Methoden zur Ableitung von Bewegungsraten unterschiedlicher Genauigkeit, werden mit Hilfe des geostatistischen Kriging-Verfahrens zunächst zu gebietsweisen Bodenbewegungsmodellen kombiniert. Durch diese ganzheitliche Betrachtung der Bewegungsinformationen können die Vorzüge der jeweiligen Techniken optimal genutzt und die individuellen Schwächen ausgeglichen werden. Mithilfe der erstellten Bodenbewegungsmodellen und Verschneidung mit weiteren Informationen, wie beispielsweise die Einflussbereiche von Lagerungsstätten, kann eine systematische Klassifizierung und Abgrenzung der Gebiete mit Bodenbewegungen sowie eine grafische Visualisierung erfolgen. In Niedersachsen wurde dazu als Grenzwert für den Nachweis von Bodenbewegungen eine Höhenänderung von 3 mm/Jahr eingeführt. Sollte



**Abbildung 2:** Exemplarisches Ergebnis einer Zeitreihenanalyse der SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstation Rotenburg (BRÖCKMEYER 2018)

dieser Wert nicht überschritten werden, so gilt das untersuchte Gebiet als Verdachtsgebiet. Des Weiteren sind zur Modellierung die eingehenden Beobachtungen auf Netzspannungen zu analysieren, da diese von tatsächlichen Bewegungsgebieten zu trennen sind. Die Abbildung 3 verdeutlicht das niedersächsische Schema zur Datenerhebung und Klassifikation von Bodenbewegungsgebieten.

### 3. Interpolation von Geschwindigkeitsinformationen mittels Geostatistik zur Erfassung von Bodenbewegungsgebieten

Bevor Bewegungsraten zur Erfassung von Bodenbewegungsgebieten interpoliert werden, erfolgt zunächst eine räumliche Strukturanalyse (Variographie) der zu interpolierenden Beobachtungen im Untersuchungsgebiet (D). Dazu werden die Beobachtungen, in diesem Fall Geschwindigkeiten, als Realisierungen von ortsabhängigen Zufallsvariablen ( $z_{i=1, \dots, n}$ ) an den Punkten ( $x_{i=1, \dots, n}$ ) betrachtet (SCHAFMEISTER 1999). Dabei wird die geostatistische Grundannahme der Homogenität der Beobachtungen getroffen, wodurch angenommen wird, dass sich benachbarte, ortsabhängige Zufallsvariablen gleich verhalten (räumliche Korrelation). So sollten z.B. benachbarte Messpunkte ähnliche Geschwindigkeiten aufweisen, wohingegen sich weiter auseinanderliegende Zufallsvariablen unterscheiden können.

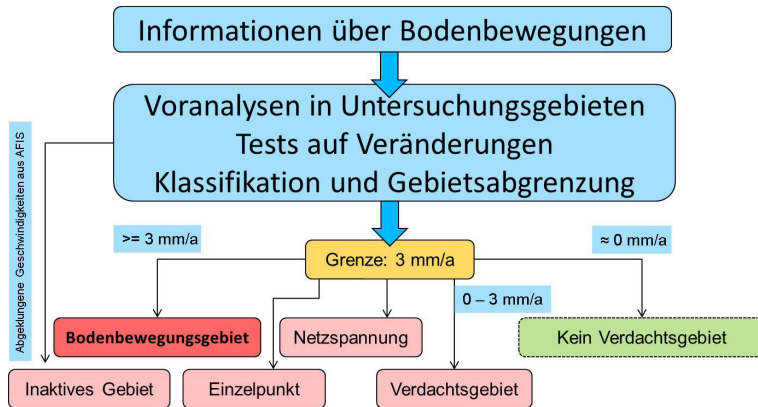


Abbildung 3: Schema zur Datenerhebung und Klassifikation von Bodenbewegungsgebieten

Anschließend wird das resultierende Variogramm aus der räumlichen Strukturanalyse eines Bodenbewegungsgebietes zur Berechnung eines regelmäßigen Interpolationsrasters mittels Kriging verwendet. Das Interpolationsverfahren bietet somit die Möglichkeit die individuellen räumlichen Strukturen des Untersuchungsgebietes einzubeziehen. Neben einem Schätzwert liefert das Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit auch die zugehörige Varianz.

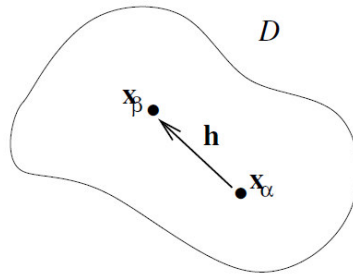
### 3.1. Räumliche Strukturanalysen mittels Variogramme

Zu Beginn einer räumlichen Strukturanalyse wird das experimentelle oder auch empirische Variogramm aus den vorhandenen zu interpolierenden Beobachtungen abgeleitet. Das zu berechnende Variogramm gibt Auskunft über die räumliche Variabilität der Messwerte ( $z_{i=1, \dots, n}$ ) im Untersuchungsgebiet (D). Dabei wird der Grundsatz der Stationarität vorausgesetzt, die in der Geostatistik auch als intrinsische Hypothese bezeichnet wird. Das bedeutet, dass der Erwartungswert der Inkremente  $[z(x) - z(x+h)]$  im gesamten Untersuchungsgebiet 0 ergibt und ortsunabhängig ist. Zur Bestimmung der Inkremente kennzeichnet  $h$ , wie in Abbildung 4 dargestellt, den Vektor zwischen zwei Stützstellen in der zu analysierenden Domäne (D). Zur Vereinfachung wird nachfolgend nur der Betrag des Abstandsvektors  $h$  betrachtet und die zugehörige Richtung vernachlässigt, womit eine isotrope Charakteristik von Bodenbewegungsgebieten vorausgesetzt wird. Da die Annahme der Stationarität in der Realität nicht zutrifft, kann die Varianz der Inkremente, in Abhängigkeit des Abstandes ( $h$ ) zwischen den Zufallsvariablen berechnet werden, die wie folgt, die Semivarianz  $\gamma(h)$  beschreibt (NIEMEIER 2008).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} (z(x) - z(x+h))^2 \quad (1)$$

Die Semivarianz wird für alle Punktkombinationen der zu untersuchenden Stützstellen berechnet und in Abhängigkeit des Betrags des Abstandsvektors  $h$  in einem Diagramm aufgetragen, sodass eine „Variogramm Cloud“ entsteht. Anschließend werden Abstandsklassen (lags) gebildet, in deren Intervall die zugehörigen Semivarianzen gemittelt werden. Die berechnete mittlere Semivarianz repräsentiert dann die jeweilige Abstandsklasse.

Typischerweise steigt die Semivarianz mit zunehmendem Abstand  $h$  an, bis ab einer bestimmten Reichweite ein Grenzwert erreicht wird, der „sill“ genannt wird. Der Abstand, an dem der Sill erreicht wird, wird als „Range“ bezeichnet. Dieser gibt die maximale Reichweite der räumlichen Korrelation



**Abbildung 4:** Untersuchungsgebiet  $D$  mit den Messpunkten  $x_\alpha$  und  $x_\beta$  mit dem Differenzvektor  $h$ . Zur Berechnung des Inkrements kann der Punkt  $x_\beta$  auch als  $(x_\alpha + h)$  beschrieben werden. (WACKERNAGEL 1998)

der Zufallsvariablen an. Das beschriebene Verhalten der steigenden Semivarianz deutet auf vorhandene räumliche Strukturen im Datenmaterial hin, wobei der Sill mit der Varianz aller Messwerte  $z_{i=1,\dots,n}$  übereinstimmen kann (WACKERNAGEL 1998).

Das zuvor beschriebene experimentelle Variogramm liefert jedoch nur für abgetastete Abstandsklassen Semivarianzen, die die räumliche Variabilität und Struktur des Datensatzes beschreiben. Zur Interpolation unter Verwendung des Kriging-Verfahrens, werden jedoch Information für beliebige Distanzen benötigt. Daher wird das experimentelle Variogramm durch eine theoretische Variogrammfunktion approximiert, wobei darauf zu achten ist, dass diese mathematische Funktion nur positive Varianzen liefert. Die Parameter des theoretischen Variogramms werden mittels Ausgleichung eines geeigneten funktionalen Modells durch die empirischen Semivarianzen optimal bestimmt. Zur Beschreibung von realen Messwerten hat sich dabei eine Exponentialfunktion als optimales und „robustes“ Verfahren erwiesen.

### 3.2. Ordinary Kriging als geostatistisches Interpolationsverfahren

In einer allgemeinen Modellvorstellung können orts-/zeitabhängige Zufallsvariablen ( $z_{i=1,\dots,n}$ ) aus einem globalen Trend, einer lokalen Fluktuation und einem zufälligen Rauschen bestehen. Mittels Ordinary Kriging wird jedoch zunächst nur die lokale Fluktuation betrachtet, weshalb ein globaler Trend einer Zufallsvariable mithilfe geeigneter deterministischer Verfahren zu entfernen ist.

Der Interpolationswert (Krigingschätzer)  $Z_{(x_0)}^*$  zwischen den stationären Stützstellen wird durch eine Linearkombination (Gleichung 2) ausgedrückt, wobei die Gewichte  $\lambda_i$  der Beobachtungen  $Z_{(x_i)}$  als Unbekannte zu schätzen sind.

$$Z_{(x_0)}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_{(x_i)} \quad (2)$$

Dabei sind die Gewichte der Beobachtungen so zu bestimmen, dass der Interpolationswert erwartungstreu geschätzt wird. Unter Annahme einer Stationarität im Untersuchungsgebiet ergibt sich dadurch die Bedingung, dass die Summe der Gewichte eins ergibt. Anhand dieser Restriktion wird deutlich, dass es sich bei dem Interpolationswert auf Basis des Kriging-Verfahrens grundsätzlich um einen gewichteten Mittelwert aus den räumlichen Zufallsvariablen handelt.

Durch Minimierung der Varianz des Krigingschätzers, Einhaltung der Nebenbedingung  $\sum_{i=1}^n \lambda_i$  und Annahme einer Stationarität der Zufallsvariablen kann das folgende Gleichungssystem in Matrixschreibweise aufgestellt werden (MONTERO ET AL. 2015). Da für dieses Kriging-System die Kenntnis der Kovarianzen ( $C$ ) zwischen den Stützstellen ( $x_{i=1, \dots, n}$ ) untereinander und zu der Interpolationsstelle ( $x_0$ ) erforderlich sind, wird zum Aufstellen der Gleichungen das zuvor bestimmte theoretische Variogramm benötigt.

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Unter Verwendung des Zusammenhangs zwischen Semivarianz  $\gamma$  und Kovarianz in Gleichung 4, lassen sich aus dem Variogramm für beliebige Abstände die zugehörigen Kovarianzen berechnen. In dieser Formel kennzeichnet die Variable  $C(0)$  den Sill-Parameter des theoretischen Variogramms, welcher die räumliche Varianz der Zufallsvariablen ausdrückt.

$$C(x_i - x_j) = C(0) - \gamma(x_i - x_j) \quad (4)$$

Neben einer räumlichen Streuung unterliegen erfasste Messwerte, wie z. B. Geschwindigkeiten aus PSI-Analysen, auch zufälligen Fehlereinflüssen sowie Unsicherheiten aufgrund des Auswerteverfahrens. Es ist demzufolge unrealistisch, dass die zu modellierende „Interpolationsoberfläche“ exakt die eingehenden Stützpunkte widerspiegeln und keine Verbesserungen zugelassen werden. Daher wird die Varianz-Kovarianz-Matrix aus der Formel 3 für Bodenbewegungsmodellierungen um die individuellen Varianzen der zu interpolierenden Messwerte  $\delta_{i=1, \dots, n}^2$  zur Berücksichtigung der zusätzlichen Genauigkeitsinformationen ergänzt. Das erweiterte Kriging-System lässt sich also wie in Gleichung 5 ersichtlich aufstellen, wodurch es sich nicht mehr um ein exaktes Interpolationsverfahren handelt (WACKERNAGEL 1998). Außerdem wird dadurch die Möglichkeit eröffnet, Beobachtungen unterschiedlicher Genauigkeit zu einem Gesamtmodell zu kombinieren, was für den Bodenbewegungsdienst Niedersachsen erforderlich ist.

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) + \delta_1^2 & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) + \delta_n^2 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Neben dem Interpolationswert lässt sich unter Verwendung der nachfolgenden Formel 6 ebenfalls die zugehörige Varianz berechnen, die auch als Krigingvarianz bezeichnet wird (MONTERO ET AL. 2015). Diese sinkt mit abnehmendem Abstand zu den nächst gelegenen Beobachtungen und deren Anzahl.

$$\delta_{x_0}^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) + \mu \quad (6)$$

#### 4. Modellierung des Bodenbewegungsgebietes Hengstlage durch Kombination unterschiedlicher Messverfahren

Im Bereich Hengstlage, südlich von Oldenburg, wird seit den 1960er Jahren aus mehreren Erdgasfeldern aktiv Gas gefördert. Dadurch werden großflächige Senkungsgebiete und Lageverschiebungen an

der Erdoberfläche hervorgerufen. Dies führt in dem Einflussbereich zu Lage- und Höhenänderungen, was unter Anderem in Höhenlinienanalysen im Projekt zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes festgestellt wurde (JAHN ET AL. 2011). Zur genauen Abgrenzung und Erfassung der Bewegungsraten des Bodenbewegungsgebietes, hatte das LGLN die Firma TRIGIS 2011 beauftragt eine PSI-Auswertung auf Basis der Envisat Satellitenmission durchzuführen. Des Weiteren wurden, wie in Kapitel 2 beschrieben, die vorhandenen Höhen- und Lageänderungen aus dem amtlichen Nachweis aufbereitet. Weiterhin wurden Daten einer Bachelorarbeit (NIEHAUS 2017) der Jade-Hochschule Oldenburg, basierend auf SAPOS®-HEPS Messungen, verwendet. Zur Überführung der punktuellen Bewegungsinformationen in ein flächenhaftes Bodenbewegungsmodell, diente der oben beschriebene Kriging-Ansatz. Die Modellierung erfolgte dabei separat für die drei Koordinatenkomponenten East, North und Höhe.

#### 4.1. Flächenhafte Modellierung der Höhenänderungen

Zur flächenhaften Modellierung der Höhenänderungen stehen insgesamt 106 Höhenfestpunkte in einem einheitlichen Horizont im Bereich des Erdgasfeldes Hengstlage zur Verfügung. Die Nivellements zur Erstellung der Zeitreihen wurden zwischen 1988 und 2008 durchgeführt und liegen somit in der aktiven Förderungszeit. Die maximale Senkungsrate beträgt im Zentrum des Bodenbewegungsgebietes 9,9 mm / Jahr. Weiterhin wurden in dem überwiegend ländlich geprägten Bereich 12888 konstante Rückstreuer (PS) in den Radarszenen der PSI-Auswertung detektiert. Als Basis zur Geschwindigkeitsschätzung der PS dienten dabei die Envisat Radaraufnahmen zwischen den Jahren 2003 und 2010. Zur Veranschaulichung der zur Verfügung stehenden Datenbasis, zeigt Abbildung 5 die Verteilung der farblich kodierten PS-Geschwindigkeiten und die Geschwindigkeiten der Höhenfestpunkte als Vektoren.

Die Abbildung 5 zeigt eine systematische Kippung in Ost-West Richtung in den PSI-Ergebnissen, die sich von den Bewegungen der Höhenfestpunkte unterscheidet. Außerdem weisen die geschätzten PS-Geschwindigkeiten eine hohe räumliche Variabilität auf, wodurch benachbarte Rückstreuer ein unterschiedliches Bewegungsverhalten aufweisen können. Dies deutet auf Ausreißer im Datenmaterial, die vor der Modellierung zu detektieren und entfernen sind.

Zur Ausreißerdetektion wird zunächst eine ausgleichende Gerade mit der zugehörigen Standardabweichung der Gewichtseinheit durch jede PSI-Zeitreihe geschätzt. Die berechneten Standardabweichungen sind ein Maß für die Streuung der Zeitreihen und werden in einem Histogramm, das bei 6 mm begrenzt wird, aufgetragen. Geschwindigkeiten mit größerer Streuung werden eliminiert. Anschließend erfolgt eine räumliche Medianfilterung, wodurch hochfrequente Störungen aus dem Datenmaterial gefiltert werden. Durch Differenzbildung der PS-Bewegungsraten mit einem Schwellwert von 2 mm / Jahr vor und nach der Medianfilterung werden die Ausreißer detektiert und als räumliche Störung entfernt. Durch diese qualitätssichernden Maßnahmen verbleiben abschließend zur Modellierung 5962 PS-Bewegungsraten, die noch um die systematische Kippung zu korrigieren sind. Um diese Geschwindigkeiten mit den Höhenänderungen aus dem amtlichen Nachweis vergleichbar zu machen, wird der systematische Anteil der Bewegungsraten abgespalten und mittels Kriging für jeden Höhenfestpunkt eine Geschwindigkeit aus dem PSI-Datensatz geschätzt.

Die daraus berechneten Differenzen zwischen interpolierter PS-Bewegungsraten und den bekannten Höhenänderungen an den amtlichen Festpunkten, werden zur Ausgleichung einer Ebene verwendet, die als Verbesserung an die PS-Informationen angebracht werden kann. Abbildung 6 zeigt den gefilterten und korrigierten Datenbestand, der zur flächenhaften Modellierung des Bodenbewegungsgebietes verwendet werden kann.



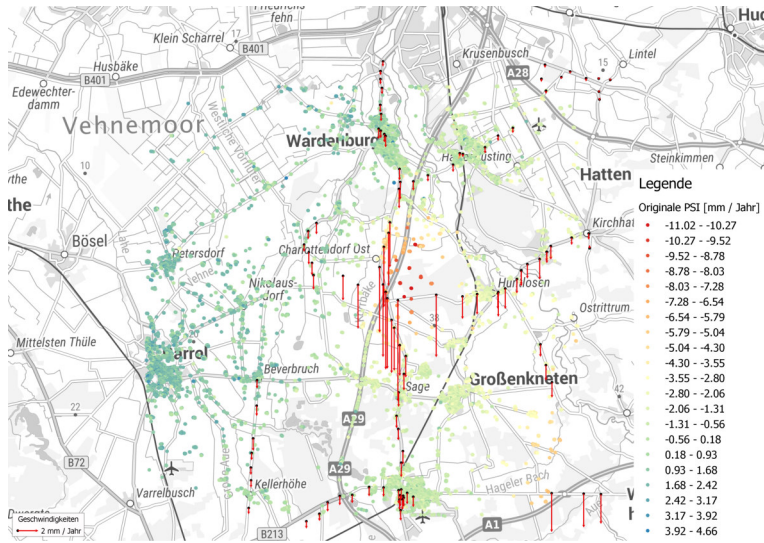


Abbildung 5: Originale PSI-Ergebnisse und Höhenänderungen aus dem AFIS

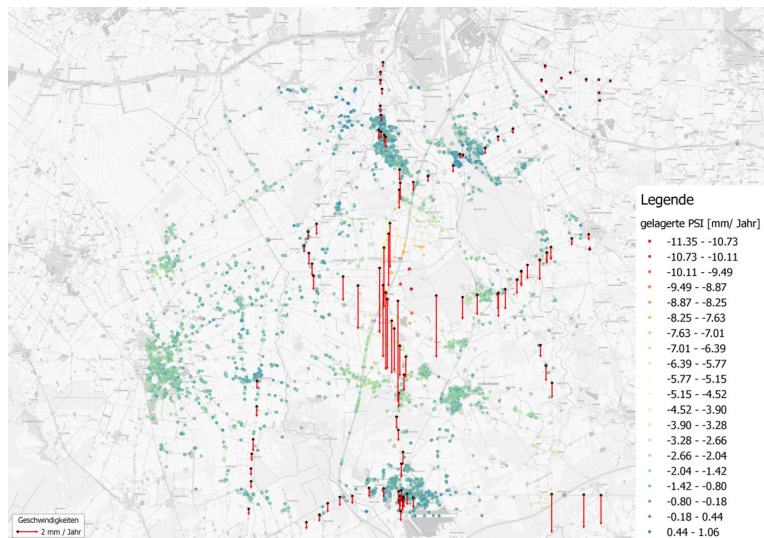


Abbildung 6: Gefilterte und korrigierte PSI-Ergebnisse sowie Höhenänderungen aus dem AFIS

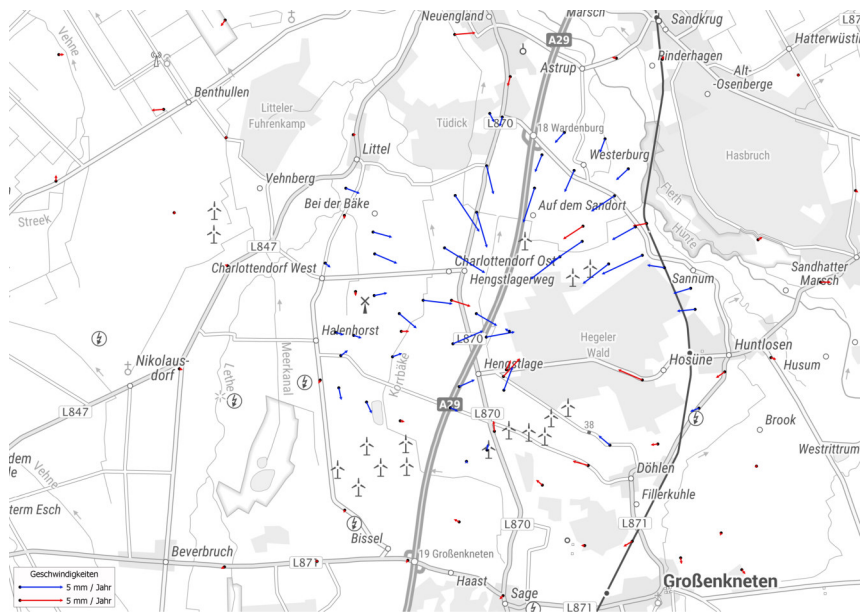


Die Abbildung 7 zeigt farblich kodiert das modellierte Bodenbewegungsgebiet Hengstlage unter Berücksichtigung der PSI Informationen und die Höhenänderungen aus dem amtlichen Nachweis. Auch wenn die PS-Datensätze nach der Ausreißerdetektion noch ein räumliches Rauschen aufweisen, konnte durch den erweiterten Kriging-Ansatz ein homogenes Geschwindigkeitsmodell berechnet werden.

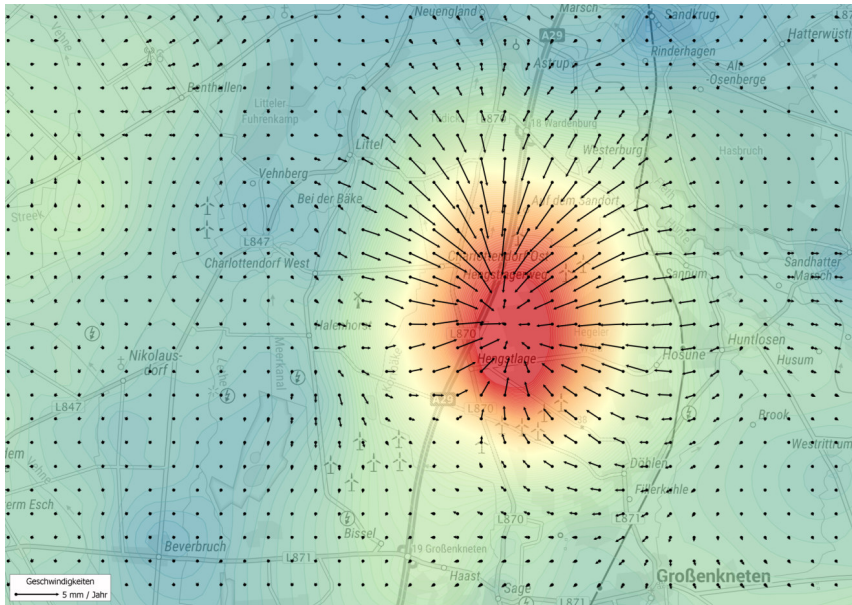
#### 4.2. Flächenhafte Modellierung der Lageverschiebungen

Zur Modellierung der horizontalen Lageverschiebungen standen insgesamt 115 Lagefestpunkte mit Bewegungsinformationen zur Verfügung. Die Messungen wurden zwischen 1968 und 2017 unter Verwendung tachymetrischer und GNSS-Messverfahren durchgeführt. Einen Überblick über die Verteilung und Größenordnung der Veränderungsbeträge gibt Abbildung 8. Darin zeigen die roten Vektoren die horizontalen Bewegungsraten aus AFIS und die blauen Vektoren die SAPOS<sup>®</sup>-Messungen aus der Bachelorarbeit (NIEHAUS 2017).

Zur horizontalen Bodenbewegungsmodellierung mittels Kriging (siehe Kapitel 3) wurden zunächst zwei separate Variogramme für die Bewegungsraten in East- und North-Richtung berechnet, die zur Definition des jeweiligen Krügingsystems eingingen. Es handelt sich somit um zwei getrennte Interpolationsverfahren, deren Ergebnisse an den regelmäßigen Interpolationsstellen wieder zu 2D-Bewegungsraten zusammengeführt wurden. Abbildung 9 zeigt das plausibel modellierte Vektorfeld der Horizontalbewegungen mit den farblich abgestuften Höhenänderungen im Hintergrund. So wurden im Zentrum kleine Lageverschiebungen geschätzt, die zum Randbereich zunehmen und anschließend wieder ausklingen.



**Abbildung 8:** Vorhandene Lageverschiebungen im Bereich Hengstlage. Rot: Daten aus AFIS, Blau: Verdichtungsmessungen unter Verwendung von SAPOS<sup>®</sup>



**Abbildung 9:** Modelliertes Vektorfeld der Horizontalbewegungen mit den farblich abgestuften Höhenänderungen

## 5. Ausblick

Die vorgestellten Analyseansätze wurden im Rahmen der Einführung des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen entwickelt. Die Erweiterung auf andere Datengrundlagen (Nivellement, GNSS, PSI) und auf bundeslandweite Auswertungen sind zukünftige Schritte beim Aufbau dieses zukunftsorientierten Dienstes.

## Literatur

ADV (2017): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-Adv), Version 3.0 – Stand 16.05.2017, URL: <http://www.adv-online.de>, zuletzt abgerufen: 22.01.2019

BROCKMEYER, M. (2018): Zeitreihenanalyse des bestehenden, bundesweiten **SAPOS**<sup>®</sup>-Koordinatenmonitorings zur Verwendung im BBD. Nutzerworkshop: BBD in der Anwendung, BGR Hannover, 05.12.2018.

WANNINGER, L., ROST, C., SUDAU, A., WEISS, R., NIEMEIER, W., TENGEN, D., HEINERT, M., JAHN, C.-H., HORST, S. & SCHENK, A. (2009): Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. Die Küste, Heft 76.

- JAHN, C.-H., FELDMANN-WESTENDORFF, U., GRÜNER, D., KULLE, U. & LEMBRECHT, P. (2011): Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen. NaVKV 4/2011, S. 3 – 25.
- KALIA, A. C., FREI, M. & LEGER, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. Remote Sensing of Environment.
- MONTERO, J.-M., FERNÁNDEZ-AVILÉS, G. & MATEU, J. (2015): Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modeling and Kriging. Wiley & Sons.
- MI, NIEDERSÄCHSISCHES INNENMINISTERIUM (2016): Realisierung, Führung und Bereitstellung des Landesbezugssystems in Niedersachsen (Raumbezugserlass).
- NIEHAUS, S. (2017): Messung und Analyse horizontaler Bodenbewegungen in einem Erdgasgebiet unter Berücksichtigung katastertechnischer Aspekte. Jade-Hochschule Oldenburg, Bachelorarbeit.
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. Verlag de Gruyter, Berlin, 2. Auflage.
- SCHAFMEISTER, M.-T. (1999): Geostatistik für die hydrologische Praxis. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- WACKERNAGEL, H. (1998): Multivariate Geostatistics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- ZIPPELT, K. (1988): Modellbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von Vertikalbewegungen unter Verwendung von Präzisionsnivelements. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 343